

Е. В. Маслюков, В. А. Палкин

ОЧИСТКА РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА В R-КАСКАДАХ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ОТБОРОМ

Предложен метод очистки регенерированного урана. Он базируется на расчете R-каскадов с промежуточным потоком отбора. В соответствии с разработанным методом рассчитаны R-каскады по различным ключевым компонентам. Лучший из них выбран по критерию максимального потока.

Ключевые слова: *регенерированный уран, очистка загрязненного сырья, R-каскад.*

One proposed a new method of reprocessed uranium refinement. Method based on the calculation of the MARC cascade with intermediate product flow. According to the developed method made calculations for MARC cascades based on different uranium isotopes. Best cascade was chosen using maximum flow criteria.

Keywords: *reprocessed uranium, uranium refinement, MARC.*

Природный уран используется в качестве исходного топлива для атомных энергетических станций. После облучения в реакторе топливо преобразуется в регенерированный уран, также играющий важную роль в ядерно-топливном цикле. Он характеризуется содержанием изотопа ^{235}U , концентрация которого обычно выше, чем в природном.

Основной проблемой использования регенерированного урана в ядерно-топливном цикле является наличие минорных изотопов $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$, которые невозможно отделить химическим путем. Два наиболее легких минорных изотопа высоко-радиоактивны, а тяжелый является замедлителем нейтронов, тем самым снижая качество топлива, произведенного из регенерированного урана. Таким образом, для сведения к минимуму радиационной опасности и улучшения качества топлива необходимо снижать концентрацию $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ [1]. С этой целью можно применять каскадную технологию разделения гексафторида урана (UF_6) и операции разбавления.

Известные методики очистки регенерированного урана имеют ряд недостатков. Некоторые из них предполагают получение в каскаде смеси с содержанием ^{235}U более 5 % [2]. Другие требуют подпитки каскада природным ураном [3]. Третьи обеспечивают существенную очистку только от одного из минорных изотопов [4].

В настоящей работе рассмотрен метод очистки регенерированного урана в R-каскаде с одним потоком питания и промежуточным потоком отбора, основанный на методике [5]. Содержание ^{235}U не превышает 5 %. Проведен численный эксперимент на примере нескольких R-каскадов.

Описание математической модели

Принципиальная схема противоточного симметричного каскада, состоящего из n ступеней, представлена на рис. 1.

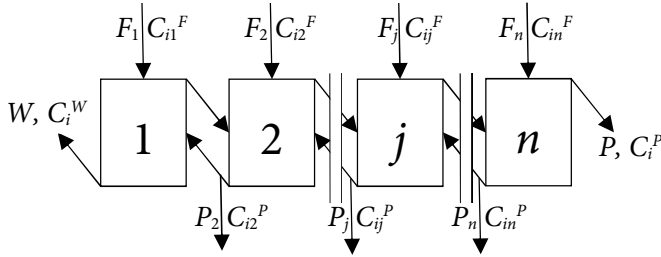


Рис. 1. Схема противоточного симметричного каскада

Здесь W и P — потоки отвала и основного отбора каскада; F_j и P_j — потоки внешнего питания и промежуточного отбора j -й ступени; C_i^W , C_i^P , C_{ij}^P и C_{ij}^F — соответствующие концентрации i -го компонента. Промежуточные потоки P_j отбираются из потоков отвала ступеней. При отсутствии одного или нескольких потоков отбора они задаются нулевыми. Общее число независимых внешних и внутренних параметров каскада на рис. 1 составляет $n(m+2) - 1$.

Согласно методике [5] срезы парциальных потоков представляются в виде:

$$\varphi_{ij} = L'_{ij} / L_{ij} = \sigma_j q_{ij} / (1 + \sigma_j q_{ij}), \quad j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где σ_j — коэффициенты, определяющие соотношение между коэффициентами обогащения компонентов в отвале и отборе j -й ступени. Для любого i -го компонента отбора j -й ступени можно записать:

$$\begin{aligned} L''_{ij+1} - L'_{ij} &= (1 - \varphi_{ij+1})L_{ij+1} - \varphi_{ij}L_{ij} = \tau_{ij+1}, \quad j = \overline{1, n-1}; \\ L''_{i1} &= (1 - \varphi_{i1})L_{i1} = \tau_{i1}; \\ L'_{in} &= \varphi_{in}L_{in}, \end{aligned} \quad (2)$$

где τ_{ij+1} — транзитный поток i -го компонента смеси в сечении перед $(j+1)$ -й ступенью в направлении отвала. Величина транзитного потока:

$$\tau_{i1} = WC_i^W, \quad \tau_{ij+1} = WC_i^W - \sum_{s=1}^j (F_s C_{is}^F - P_{s+1} C_{is+1}^P), \quad j = \overline{1, n-1}. \quad (3)$$

Парциальный поток для i -го компонента в питании j -й ступени будет равен

$$L_{ij} = \frac{1}{\varphi_{ij}} \sum_{l=1}^j \tau_{il} \prod_{s=l}^j \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Подставляя (4) в выражение (2) при $j = n$ можно рассчитать парциальный поток i -го компонента на отвале каскада W_i :

$$W_i = WC_i^W = \sum_{j=1}^n \left[(F_j C_{ij}^F - P_{j+1} C_{ij+1}^P) \frac{1 + \sum_{l=j+1}^n \prod_{s=l}^n \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}}{1 + \sum_{l=1}^n \prod_{s=l}^n \frac{\varphi_{is}}{1 - \varphi_{is}}} \right], \quad i = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Парциальный поток i -го компонента на отборе определяется из уравнений баланса:

$$P_i^P = PC_i^P = \sum_{j=1}^n (F_j C_{ij}^F - P_{j+1} C_{ij+1}^P) - W_i, \quad i = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Используя выражения (1)–(6) можно рассчитать парциальные потоки всех компонентов смеси по числу ступеней n при заданных параметрах σ_j , q_{ij} и характеристикам питания, а также отборов F_j , P_j , C_{ij}^F , C_{ij}^P ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$). Остальные параметры каскада определяются по найденным парциальным потокам. Концентрации изотопа в промежуточных потоках отбора C_{ij}^P определяются с использованием итеративной процедуры, описанной в методике [5], и не являются независимыми параметрами.

В частном случае отсутствия промежуточных отборов и одного внешнего питания приведенные соотношения аналогичны формулам Ямамото-Канагава [6] для трехпоточного каскада. При использовании одинаковых σ_j по ступеням выражения (1)–(6) описывают квазиидеальный каскад. Частным случаем квазиидеального является R-каскад [7], характеризующийся несмещением по относительным концентрациям ключевых компонентов.

Расчеты

Были проведены расчеты нескольких R-каскадов с одним промежуточным отбором по различным парам ключевых компонентов. Исходные данные рассчитываемых каскадов: $n = 51$, $F_{45} = 10$ г/с, $C_{232}^F = 1,5 \cdot 10^{-7}$ %, $C_{234}^F = 1,6 \cdot 10^{-2}$ %, $C_{234}^F = 0,85$ %, $C_{234}^F = 0,35$ %. Номер ступени промежуточного отбора k изменялся от 2 до 45. P_k изменялся от 1 г/с до 5 г/с с шагом в 0,1 г/с. Коэффициенты σ_j одинаковы по ступеням. Во всех каскадах концентрация ^{235}U в отборе не превышала 5 %.

Промежуточный отбор R-каскада подается на питание трехпоточного каскада, который рассчитывается с помощью известных аналитических формул [8]. Заданы концентрации ^{235}U на отборе и отвале трехпоточного каскада: 4,4 и 0,3 % соответственно. Кроме того, в отборе ограничено содержание изотопов ^{232}U и ^{234}U — $1 \cdot 10^{-8}$ % и $4,8 \cdot 10^{-2}$ % соответственно.

Результаты расчетов

Качественный анализ расчетов показал, что концентрация изотопов $^{232-236}\text{U}$ в смеси снижается с увеличением потока промежуточного отбора и с уменьшением номера ступени промежуточного отбора. Одновременно при уменьшении номера ступени промежуточного отбора уменьшается максимальное значение потока, которое

можно отобрать из ступени. Таким образом, при каждой величине потока P_k промежуточного отбора существует оптимальный номер ступени, при котором поток отбора трехпоточного каскада будет максимален с учетом принятых ограничений. Графики зависимостей максимальных потоков отбора трехпоточного каскада P_2 от P_k представлены на рис. 2.

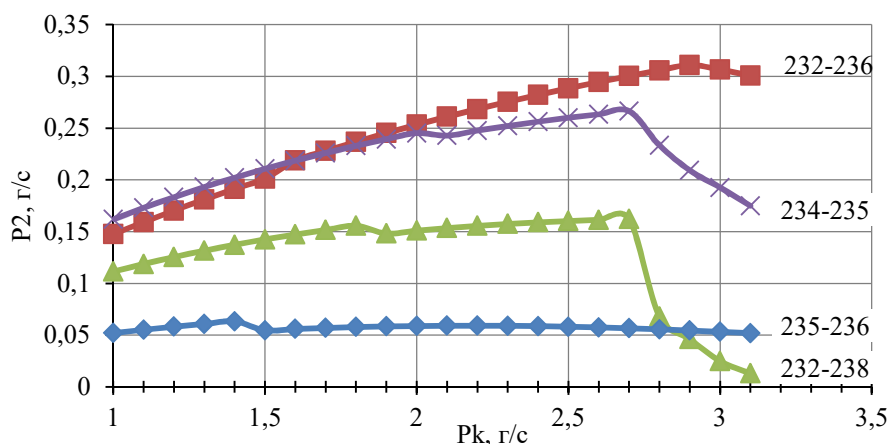


Рис. 2. Зависимость максимальных потоков отбора трехпоточного каскада от потока промежуточного отбора

С увеличением P_k содержание ^{236}U в потоке отбора ординарного каскада растет (рис. 3). Снижая поток отбора, можно существенно уменьшить концентрацию ^{236}U . Например, концентрация ^{236}U в R-каскаде по компонентам $^{232}, ^{238}\text{U}$ уменьшается более чем на 16 % при снижении потока всего на 4 %.

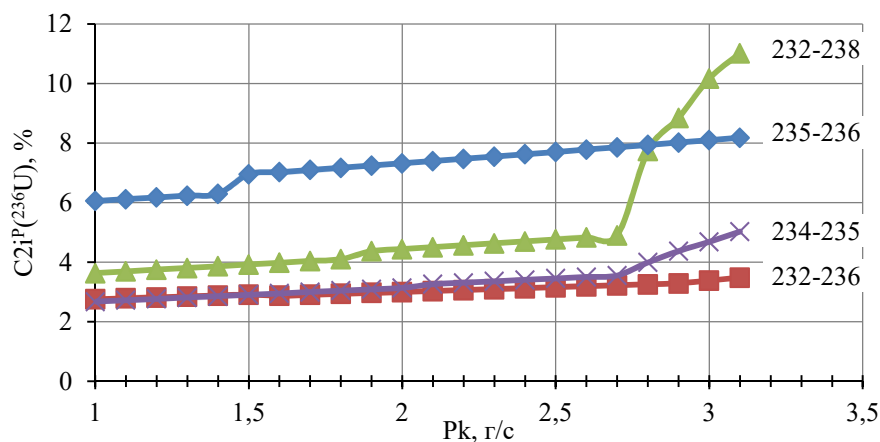


Рис. 3. Зависимость концентрации ^{236}U в отборе трехпоточного каскада от потока промежуточного отбора

Заключение

Описанный метод позволяет очищать регенерированный уран от изотопов ^{232}U , ^{234}U с использованием R-каскада и трехпоточного. Метод не требует подпитки дополнительным сырьем и позволяет рассчитывать каскады при условии поддержания концентрации ^{235}U не выше 5 % в потоках отбора.

Литература

1. Никителов Б. В., Никителов В. Б. Судьбы уранового регенерата // Бюлл. по атомной энергии. 2002. № 9. С. 34–43.
2. Власов А. А., Водозаских В. В., Мазин В. И. и др. Способ изотопного восстановления регенерированного урана: пат. 2236053 Рос. Федерация; 10.09.2004. Изобретения. Полезные модели: бюл. 2004. № 25. С. 562.
3. Сулаберидзе Г. А., Борисевич В. Д., Цюаньсинь Се. Квазиидеальные каскады с дополнительным потоком для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Теоретические основы химической технологии. 2006. Т. 40. № 1. С. 7–16.
4. Палкин В. А. Очистка регенерированного урана в каскадах с обогащением ^{235}U до 5 % // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 1. С. 28–33.
5. Палкин В. А., Маслюков Е. В. Расчет каскада с несколькими питаниями и отборами по срезам парциальных потоков // Атомная энергия. 2012. Т. 112. Вып. 5. С. 309–313.
6. Yamamoto I., Kanagawa A. Multicomponent Isotope Separating Cascade Composed of Elements with Large Separation Factors // J. Nucl. Scien. and Techn. 1987. V. 15(8). P. 580–584.
7. Изотопы: свойства, получение, применение / под ред. В. Ю. Баранова. М.: ИздАТ, 2000.
8. Палкин В. А., Маслюков Е. В. Аналитические оценки содержания изотопов слабообогащенного регенерированного урана в многопоточных оптимальных каскадах // Атомная энергия. 2009. Т. 107. Вып. 6. С. 345–348.